

**Олександр Миколайович Лопушанський<sup>1</sup>, Катерина Богданівна Смолій<sup>2</sup>,  
Роман Богданович Ванчура<sup>3</sup>, Марія Романівна Лопушанська<sup>4</sup>,  
Юлія Миколаївна Лопушанська<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук,  
доцент кафедри економічної експертизи та землевпорядкування  
Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна)  
E-mail: o.lopushanskyi@wunu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9363-2979>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедра лісової таксації та лісовпорядкування  
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)  
E-mail: katernyna.smoliy@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6731-1557>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедра лісової таксації та лісовпорядкування  
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)  
E-mail: r.vanchura@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2782-2405>

<sup>4</sup>аспірантка, аспірантка кафедри конструктивної географії і картографії  
Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів, Україна)  
E-mail: mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua ORCID ID: 0000-0002-0557-1609

<sup>5</sup>магістр, випускниця кафедри вищої геодезії та астрономії  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)  
E-mail: Julia@melnychuk.me

## ПОБУДОВА ТОПОГРАФІЧНОЇ ПОВЕРХНІ СВІТОВОГО ОКЕАНУ В РЕГІОНІ ПІВНІЧНОГО МОРЯ

Широке застосуванням сучасних космічних методів дослідження поверхні Світового океану дозволило отримувати дані про цю поверхню з точністю в 1-5 см. Такий результат можна отримати за допомогою простого методу супутникової альтиметрії, який базується на альтиметричних вимірах відповідних супутників. Визначати дистанцію від бортового альтиметра супутникової місії до поверхні Океану та отримання його положення в просторі базуючись на даних SLR, GNSS, або DORIS технологій дає можливість обчислення висот SSH (Sea Surface Heights) океанічної поверхні над прийнятим референс-еліпсоїдом [9]. При попередньому дослідженні отриманих даних SSH ввівши поправки за вплив середовища та різних геофізичних чинників до вихідної інформації, які залежать від часу, у результаті обраховуються виправлені висоти рівня океанічної поверхні  $CorSSH$ . За останню чверть століття результати опрацювання із супутникових альтиметричних місій стали дієвим засобом побудови геоїда на водних акваторіях земної поверхні. Дані супутникової альтиметрії стали вихідними даними для знаходження середніх рівнів морів та океанів на різних ділянках планети і нульових точок відліку висот. Крім того, вивчення поверхні Світового океану за даними альтиметричних місій відкрило можливість обчислення достатньо надійної оцінки середнього значення потенціалу сили ваги  $W_0$  на його поверхні. Ці значення своєю чергою мають ключове значення для реалізації світової вертикальної системи висот, пов'язаної з гравітаційним полем Землі.

**Ключові слова:** вища геодезія; геодезія; альтиметрія; картографія; морська топографія; квазігеоїд; математична обробка геодезичних вимірів; комп'ютерна графіка; супутникові навігаційні системи.

Рис.: 4. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Метод супутникової альтиметрії, як відносно новий підхід, широко розвинувся за останні 25 років. Високоточне супутникове знімання забезпечує широкий спектр досліджень про Землю детальною інформацією про стан океану та його зміни в часі. Отримані дані використовується, зокрема, у наукових роботах геодезії, океанографії та кліматології. Моделі динамічної топографії океану базуються головним чином на даних альтиметрії. Незбурена поверхня Світового океану має назву геоїд, водночас ця поверхня є основною рівневою поверхнею і є однією з найбільш вагомих референсних поверхонь у науках про Землю. Враховуючи, що до 1983 року при побудові поверхні геоїда не брали до уваги будь-які ефекти, пов'язані з припливами. У 1983 р. згідно з резолюцією IAG поверхню геоїда стали обчислювати з урахуванням непрямого припливу твердої Землі.

**Постановка проблеми.** Усереднені висоти морської поверхні є основним продуктом та результатом методу супутникової альтиметрії. Висоти отримані з опрацювання супутникових альтиметричних місій відповідають висотам геоїда та середній динамічній топографічній поверхні, осередненій за відповідний період часу і відносяться до поверхні

© О. М. Лопушанський, К. Б. Смолій, Р. Б. Ванчура, М. Р. Лопушанська, Ю. М. Лопушанська, 2024

геоїда [7; 8]. Опрацьовані результати альтиметра активно використовують для побудови та моделювання фігури Землі – геоїда. Геоїд, як відомо, служить референчною поверхнею відліку висот. Перед Україною вже давно постала ключова проблема оновлення системи висот, яку треба вирішувати якомога швидше. Відповідно до майбутніх проєктів, сучасна висотна мережа України буде відноситись до Амстердамської системи висот, що дасть змогу поєднати вітчизняну висотну систему з єдиною європейською системою висот EUVN (European Vertical Network). При цьому важливу роль буде відігравати поточний стан топографічної поверхні Північного моря [1; 2; 3], оскільки ця поверхня буде ключовою при побудові як європейського, так і загальноземного геоїда (квазігеоїда).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Шалене зростання різноманітних геодезичних технологій супроводжується не лише збільшенням типів вимірів із традиційним підвищенням їх рівня точності, але й вирішенням основної задачі геодезії - визначення фігури та гравітаційного поля Землі на більш якісному та точному рівні. Гравітаційне поле Землі ілюструє розподіл мас і перенесення їх як усередині, так і на поверхні Землі. Розмови про безперервне уточнення форми Землі не зникають багато десятиліть і є традиційними темами для наукових звершень та досліджень. Ці супутникової альтиметрії для дослідження геоїда й будуть відправною точкою для цього дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Побудова поля висот SSH для різних регіонів є постійною та актуальним завданням для дослідження топографії світового океану, аби розширити відомості про цей регіон. Вирішення цієї задачі з використанням конкретних даних альтиметрії є складним завданням, оскільки вони розташовані в основному вздовж супутникових трас (нерегулярно та не рівномірно). Пошук оптимальних способів та математичних рішень, аби отримати найбільш достовірне значення топографії Північного моря є головною проблемою, яку вирішено в цьому дослідженні.

**Мета дослідження.** З часом з'являється дедалі більше математичних та технічних рішень для опрацювання великого об'єму специфічних геодезичних даних. Супутникові дані, а особливо дані супутникової альтиметрії мають свою специфіку, адже ці дані складаються зі спостережень різних супутників. У кожного супутника своя орбіта, відповідно, перед нами постає задача якісного об'єднання даних та побудова за цими спостереженнями якісної мапи висот топографії світового океану в регіоні Північного моря.

**Виклад основного матеріалу.** Вихідною інформацією для побудови поля висот SSH (CorSSH) на регіон Північного моря, були альтиметричні виміри із семи супутникових місій, таких як: ERS-1, ERS-2, Envisat, GFO, Topex/Poseidon, JASON-1, JASON-2, які були попередньо опрацьовані на рівномірну сітку  $2' \times 2'$  за період з 1992 по 2007 рр.

Проте коли ми маємо досліджуваний масив даних із такою складною та не рівномірною геометрією розташування, завдання ускладнюється. Тому, використовуючи світовий досвід, ми переінтерполювали супутникові дані з альтиметра на вузли регулярної сітки з кроком ( $2' \times 2'$ ). Аби реалізувати такий підхід, ми застосовували програмний пакет GMT, а для побудови сітки скористались методом мінімальної кривини. Цей метод має низку вагомих козирів порівняно з іншими методами ґрдування, такими як: метод середньої квадратичної колокації, метод радіальних базисних функцій, метод найближчого сусіда і.т.д. Важливою і найбільш визначальною перевагою цього підходу є його висока швидкість порівняно з усіма вищепереліченими методами. Хоча цей метод і не відноситься до методів точної інтерполяції, а є ітеративним, задаючи певну точність остаточних результатів інтерполяції (яка звісно визначається точністю вихідної інформації) можна досить швидко отримати якісні результати. Важливо сказати, що точні інтерполяційні способи потребують розв'язання великих систем лінійних рівнянь. При значній кількості вихідних даних може займати багато часу.

Для вирішення поставленої задачі необхідно привести всі дані до системи еліпсоїда WGS84 ( $a_{WGS84}=6378137$  м;  $f_{WGS84}=1/298.257223563$ ), у якій задано висоти квазігеоїда.

На першому етапі весь масив альтиметричних даних був приведений у єдину систему відліку, оскільки центр AVISO виконує обробку вихідної інформації відносно еліпсоїда AVISO:  $a_{AVISO}=6378136,3$  м;  $f_{AVISO}=1/298,257$ , прийнятого для системи TOPEX [4].

У цьому випадку трансформацію достатньо виконати за формулами:

$$CorSSH_{WGS84}=(r_{AVISO}-r_{WGS84})+CorSSH_{AVISO}, \tag{1}$$

$$r_{AVISO}=a_{AVISO}(1-f_{AVISO} \sin^2 B), r_{WGS84}=a_{WGS84}(1-f_{WGS84} \sin^2 B), \tag{2}$$

де  $CorSSH_{WGS84}$ ,  $CorSSH_{AVISO}$  – висоти поверхні океану відносно еліпсоїда WGS84 та AVISO відповідно;  $B$  – широта,  $a_{WGS84}$ ,  $f_{WGS84}$ ,  $a_{AVISO}$ ,  $f_{AVISO}$  – параметри відповідних еліпсоїдів (велика піввісь і стиснення);  $r_{WGS84}$ ,  $r_{AVISO}$  – значення геоцентричних радіусів цих еліпсоїдів.

Остаточна регулярна сітка простягалась від 50 градуса пн. широти до 63 градуса пн. широти та від 355 градуса східної довготи до 12 градуса західної довготи, що охоплює площину досліджуваної території. Значення SSH вузлів сітки, які потрапляли на суходіл були вилучені із сітки. При цьому в сітці залишились тільки дані на територію Північного моря (рис. 1).

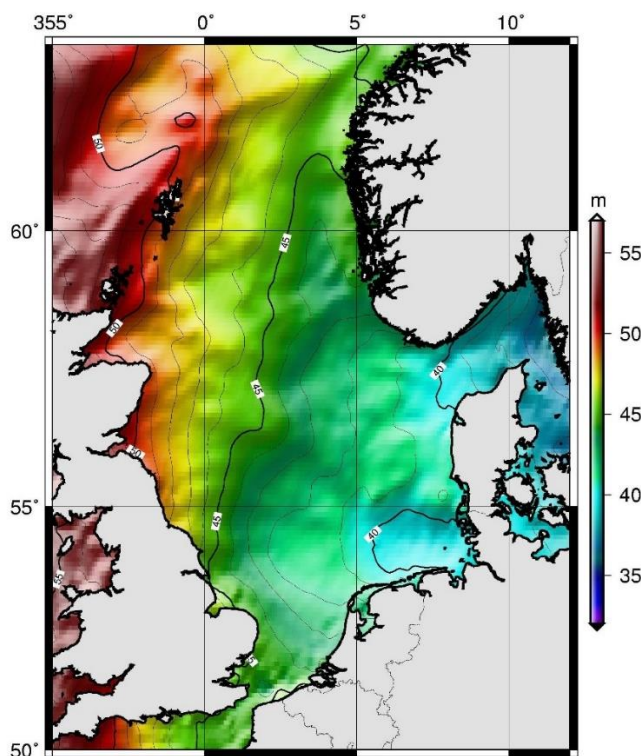


Рис. 1. Значення висот SSH [м] на регіон Північного моря

Рисунок 1 демонструє відфільтровані дані SSH для обчислення висот рівня моря на рівномірній сітці зі значеннями  $SSH_0$ , що одержані за альтиметричними вимірами. Після приведення  $CorSSH$  та висот квазігеоїда до єдиної системи (статистики наведені в табл. 1) та їх осереднення на вибрану рівномірну сітку, можливою стає побудова поля висот моделі топографії досліджуваного регіону [5].

Таблиця 1 – Статистичні характеристики даних SSH

| Статистики            | Північне море $CorSSH$ , м |
|-----------------------|----------------------------|
| Мінімальне значення   | 35                         |
| Максимальне значення  | 55                         |
| Середнє значення      | 44,73                      |
| Стандартне відхилення | 4,34                       |

Далі отримані значення були приведені до припливної системи ZFTS (zero frequency time system). Для цього ми скористались формулою (3).

$$N_{MTS} = N_{ZFTS} - 0,198 \left( \frac{3}{2} \sin^2 B \right), \tag{3}$$

Наведемо таблицю статистичних характеристик, трансформованих даних WGS84 в систему ZFTS.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики, трансформованих даних WGS84 в систему ZFTS

| Статистики            | Північне море ZFTS, м |
|-----------------------|-----------------------|
| Мінімальне значення   | 35,53                 |
| Максимальне значення  | 55,03                 |
| Середнє значення      | 45,05                 |
| Стандартне відхилення | 4,35                  |

Ці припливні ефекти мають бути враховані з метою приведення параметрів, що порівнюються в єдину припливну систему. Зауважимо, що редукція (3) сягає максимального значення – 0.5 м. Після приведення SSH до середньої припливної системи, можна отримати висоти топографії моря (рис. 2) для досліджуваного регіону на основі такого співвідношення:

$$SST = CorSSH - \xi_{MTS}, \tag{4}$$

де *CorSSH* є значеннями висот рівня моря з альтиметричних вимірів у системі MTS,  $\xi_{MTS}$  – висота квазігеоїда відповідно.

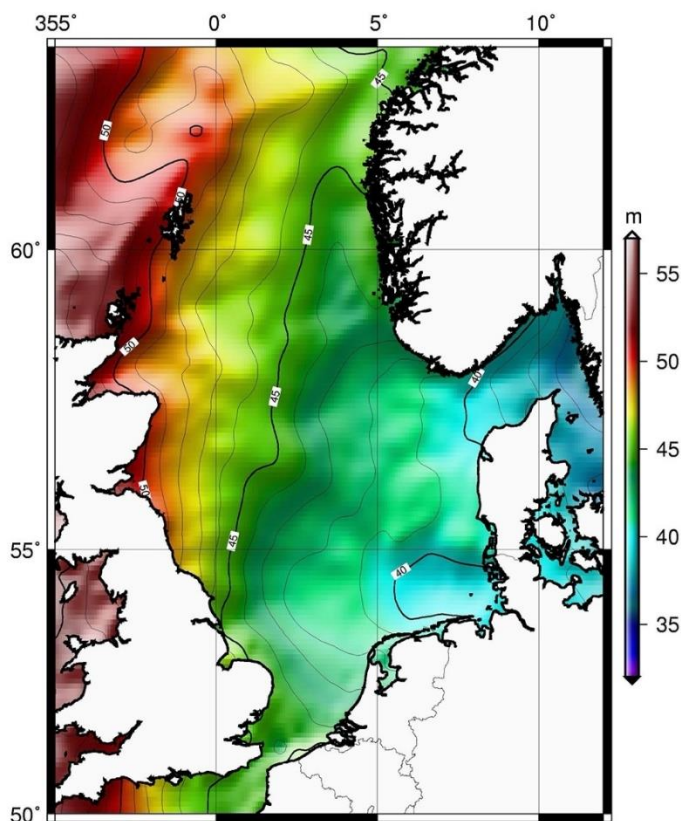


Рис. 2. Наближений геоїд [м], отриманий згладжуванням за Гауссом в регіоні Північного моря

Значення SSH вузлів сітки, які потрапляли на суходіл були вилучені. При цьому в сітці залишились тільки дані на територію Північного моря.

З огляду, що у значеннях вихідних даних існує присутність високочастотних остаточно залишків різних редукцій, що залежать від часу, необхідною є фільтрація даних одним із відомих методів. Ці залишки були видалені застосуванням відомого фільтра Гаусса [6]. Цей цифровий фільтр належить до такого типу фільтрів, який відмежовує високочастотні шуми із сигналу. При цьому центральний елемент має найбільше значення і відповідає піку розподілу Гаусса. У межах обраного вікна значення решти елементів зменшуються по мірі віддалення від центрального елемента згідно з розподілом Гаусса. Після проведеної процедури фільтрації нами отримано модель топографії океану SST (рис. 3). Черговий крок дозволяє вирішити поточну задачу побудови високоточної моделі висот поверхні моря SST, враховуючи наявність Північноатлантичної течії з висотами меншими ніж 2 м відносно поверхні геоїда [7; 8]. Усе це зумовлено доволі мілководним регіоном Північного моря у порівнянні з іншими морями.

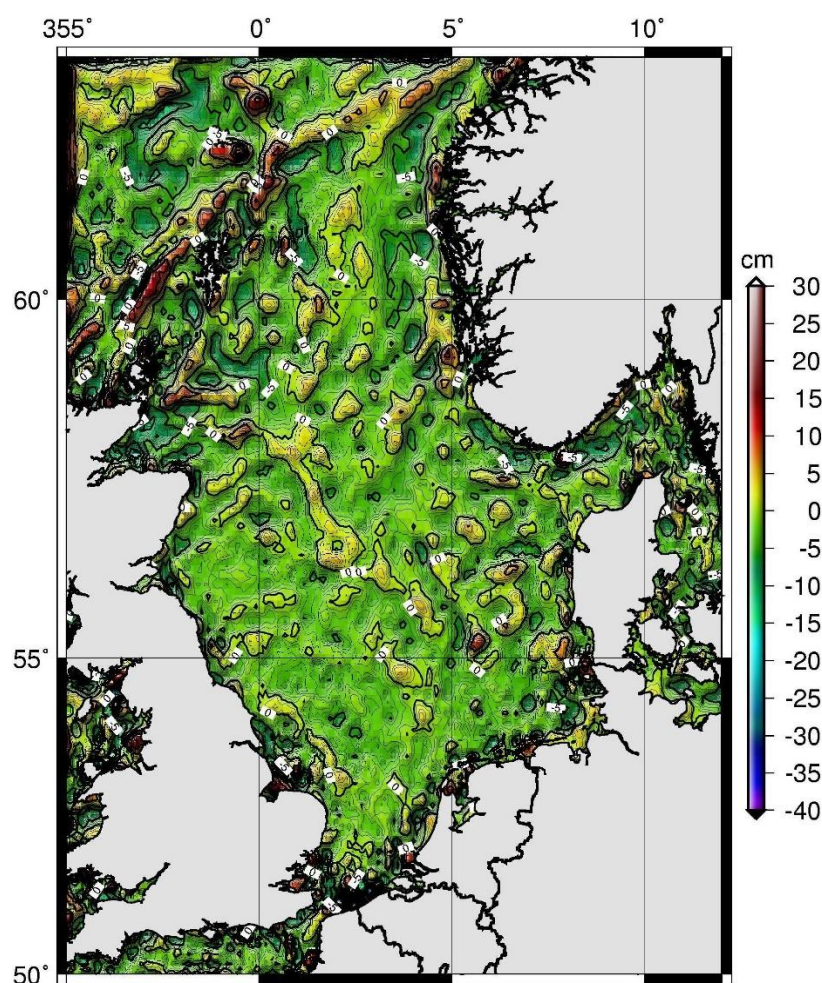


Рис.3. Значення висот топографії [см] Північного моря  $SST = SSH - N$

У процесі цієї стадії ми порівняли отриману сітку SSH з даними Європейського квазі-геоїда EGM08, щоб перевірити чи збігається вона з середнім рівнем моря. EGM08 є сучасною гравіметричною моделлю європейського квазігеоїда, яка була побудована за незалежними даними морської гравіметрії. Крім цього, при побудові EGM08 не залучалось ніяких даних супутникової альтиметрії. Для побудови моделі топографії Північного моря необхідно від висот SSH відняти висоти квазігеоїда N [9]. Модель топографії моря обчислена за

різницею між SSH-EGM08. Оскільки Північне море є калібрувальним полігоном для супутників Європейського космічного агентства (ESA), то дослідження в цьому регіоні є актуальними і мають наукове підґрунтя. Отримана модель топографії Північного моря SSTM дає можливість виконати незалежну перевірку даних висот геоїда. У результаті згладження за Гауссом було отримано модель стаціонарної частини топографії океану SSTM (4).

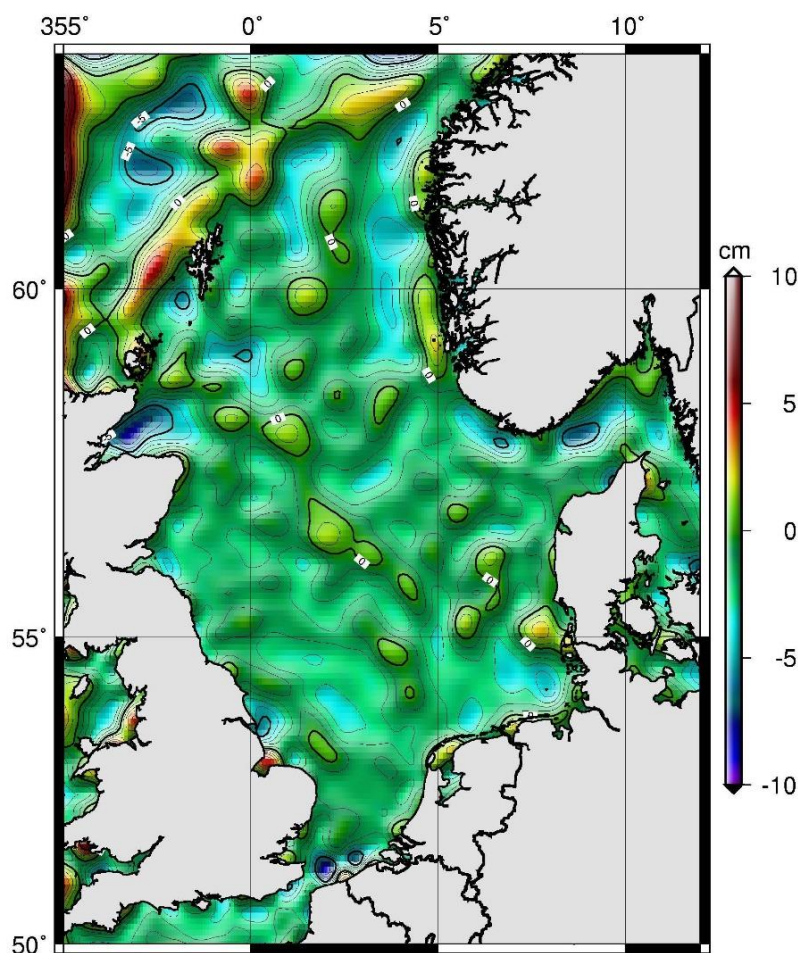


Рис. 4. Модель висот SSTM [см] обчислена фільтрацією за Гауссом

**Висновки.** У результаті виконаних досліджень було проаналізовано дані супутникової альтиметрії на регіоні Північного моря. Усього використано близько 2 млн вимірів за період з 1992р. до 2007р. Виконана фільтрація нерегулярних даних SSH та проінтерполяція на вузли регулярної сітки 2'x2' з використанням методу мінімальної кривини. Для побудови моделі топографічної поверхні моря обчислено значення висот топографії моря  $SST = SSH - N$ . Фільтровані SST дали можливість отримати стаціонарну поверхню топографії моря в регіоні Північного моря SSTM. Розроблена методика дає можливість підтвердити чи відображає високу кореляцію морських течій отриману за традиційними методами та методом супутникової альтиметрії в регіоні Північного моря.

#### Список використаних джерел

1. Третяк Н. П. Модельовання гравітаційного поля та топографії океану в регіоні Антарктики : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.24.01 — геодезія, фотограметрія і картографія / Н. П. Третяк ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2008.

2. Марченко, О. М. Моделювання топографії регіону Антарктики / О. М. Марченко, Н. П. Третяк // Вісник геодезії та картографії. – 2008. – № 4. – С. 7-10.
3. Ярема, Н. П. Основні етапи підготовки вихідних даних для побудови топографічної поверхні моря, УМНТЗ / Н. П. Ярема, О. М. Лопушанський, Т. Р. Павлів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 74. – С. 60-64.
4. Andersen, O. B. The DNSC08MDT Mean Dynamic Topography, (DTU-SPACE) / O. B. Andersen, P. Knudsen. – Danish National Space Center, 2008.
5. Andersen, O. B. Improved high resolution altimetric gravity field mapping (KMS2002 Global Marine Gravity Field) / O. B. Andersen, P. Knudsen, R. Trimmer // IAG Symposia 128:326-331, Springer Verlag, 2005.
6. Хеммінг, Р. В. Цифрові фільтри / Р. В. Хеммінг ; пер. с англ. ред. пер. О.А. Потапов. – Москва : Недра, 1987. – Пер. изд.: США, 1983. – 221 с.
7. Rio M.-H. The estimation of the ocean Mean Dynamic Topography through the combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to regional studies / Rio M.-H., P. Schaeffer, et al // Proceedings of the GOCINA international workshop, Luxembourg, 2005.
8. Rio M.-H. A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements / Rio M.-H., P. Schaeffer, G. Moreaux, J-M Lemoine, E. Bronner // Paper presented at OceanObs09 symposium, 21-25 September 2009, Venice.
9. Seeber G. Satellite Geodesy 2<sup>nd</sup> completely revised and extended edition. Walter de Gruyter, Berlin New York, 2003 – 589 p.

### References

1. Tretiak, N.P. (2008). *Modeliuvannia hrovitatsiinoho polia i topohrafii okeanu v rehioni Antarktyky* [Modelling the gravitational field and ocean topography in the Antarctic region] [PhD dissertation, National University “Lviv Polytechnics”].
2. Marchenko O.M., Tretiak N.P. Modeliuvannia topohrafii rehionu Anktarktyky [Modelling the topography of the Antarctic region]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii – Bulletin of Geodesy and Cartography*, (4), 7-10.
3. Yarema, N.P., Lopushanskyi, O.M., Pavliv, T.R. (2011). Osnovni etapy pidhotovky vykhidnykh danykh dlia pobudovy topohrafichnoi poverkhni moria [The main stages of preparing the initial data for building the topographic surface of the sea]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 74, 60-64.
4. Andersen, O.B., Knudsen, P. (2008). *The DNSC08MDT Mean Dynamic Topography, (DTU-SPACE)*. Danish National Space Center.
5. Andersen, O.B., P. Knudsen, R. (2005). *Trimmer. Improved high resolution altimetric gravity field mapping (KMS2002 Global Marine Gravity Field)*. IAG Symposia 128:326-331, Springer Verlag.
6. Khemminh, R.V. (1987). *Tsyfrovi filtry [Digital filters]* [Translation from English]. Edited in English by O.A. Potapov. Nedra, 1987.
7. Rio, M.-H., P. Schaeffer, et al. (2005). The estimation of the Ocean Mean Dynamic Topography through combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to regional studies. *Proceedings of the GOCINA international workshop*, Luxembourg.
8. Rio, M.-H., Schaeffer, P., Moreaux, G., Lemoine, J-M, Bronner, E. (21-25 September 2009). A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements. *Paper presented at OceanObs09 Symposium*, Venice.
9. Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy 2<sup>nd</sup> completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter, Berlin New York, 2003 – 589 p.

Отримано 08.08.2024

UDC 528.4

**Oleksandr Lopushanskyi<sup>1</sup>, Kateryna Smoliy<sup>2</sup>, Roman Vanchura<sup>3</sup>,  
Mariia Lopushanska<sup>4</sup>, Yulia Lopushanska<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Science,  
Associate Professor of Economic Expertise and Land Management Department  
West Ukrainian National University (Ternopil, Ukraine)

**E-mail:** [o.lopushanskyi@wunu.edu.ua](mailto:o.lopushanskyi@wunu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9363-2979>

<sup>2</sup>PhD in Technical science,  
Senior Lecturer, Department of Forest Taxation and Forest Management  
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [kateryna.smoliy@gmail.com](mailto:kateryna.smoliy@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6731-1557>

<sup>3</sup>PhD in Technical Science,  
Senior Lecturer, Department of Forest Taxation and Forest Management  
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [r.vanchura@gmail.com](mailto:r.vanchura@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2782-2405>

<sup>4</sup>PhD Student, PhD student at the Department of Constructive Geography and Cartography,  
Ivan Franko National University of Lviv (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua](mailto:mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0557-1609>

<sup>5</sup>Master of Geodesy, Student graduate of Department of Higher Geodesy and Astronomy  
National University "Lviv Polytechnics" (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Julia@melnychuk.me](mailto:Julia@melnychuk.me)

## CONSTRUCTION OF THE TOPOGRAPHIC SURFACE OF THE WORLD OCEAN IN THE NORTH SEA REGION

*Satellite altimetry is somewhat unique among ocean remote sensing techniques because it provides much more than surface observations. By measuring sea surface topography and its change in time, altimeters provide information on the Earth's gravity field, the shape and structure of the ocean bottom, the integrated heat and salt content of the ocean, and geostrophic ocean currents. Much progress has been made in the development of operational ocean applications, and altimeter data are now routinely assimilated in near-real-time to help forecast El Niño, monitor coastal circulation, and predict hurricane intensity. Although past missions have been flown largely for research purposes, altimetry is rapidly moving into the operational domain and will become a routine component of international satellite systems during the twenty-first century.*

*Regarding the rapidly growing satellite altimetry database and corresponding products worldwide, the investigation of different mean dynamic ocean topography (MDT) models was carried out, which was assessed to be important for further use in geodetic applications. The efficiency and quality of different MDT models are discussed in view of the adopted geoids as reference surfaces.*

*The region of the North Sea area was applied for the construction of the SST (Sea Surface Topography) model based on the altimetry data from 6 satellites for the total period of 15 years. Gravimetric quasigeoid and SST model were used for the comparison with independent data from 5 tide-gauges and led to the conclusion on the 44.73 cm level of accuracy of discussed models. Similar comparison of EGM2008 and computed normal heights for well-determined GPS-sites led to the low accuracy of this MDT.*

**Keywords:** higher geodesy; geodes; mathematical processing of geodetic data; altimetry; cartography; satellite navigation systems; sea surface topography; computer graphics; quasigeoid.

*Fig.: 4. References: 9.*